

## コーンパーミアメータによる土壌水分移動特性の 原位置試験法

関 勝 寿\*

### *In situ* determination of soil hydraulic parameters by Cone Permeameter

Katsutoshi Seki

#### Abstract

Soil hydraulic parameters, determined from soil water retention function and unsaturated hydraulic conductivity, are important parameters for analysing unsaturated soil water movement in soil. Direct measurement of these parameters are laborious and time consuming, and therefore establishing a method for simple measurement is desired. Cone permeameter is one of such anticipated methods, which can determine soil hydraulic parameters from the datasets of in-situ measurement. Cone permeameter has been tested with sandy soil, but it has not been tested with Japanese Andisols, volcanic ash soil. This study tested the cone permeameter measurement with Japanese soil and evaluated the applicability of this apparatus.

The test was performed at cabbage field, Tsumagoi, Gunma Prefecture, Japan. The hard pan layer existed at the depth of 30-40 cm. The measured data was used to estimate soil hydraulic parameters by optimization technique. Soil water retention curve was estimated favorably well compared with the data of hanging water column method, at the range of soil water content on site. However, saturated hydraulic conductivity estimated from the cone permeameter was 100 times smaller than the values measured by falling-head method. The discrepancy was attributed to two causes ; heterogeneity of the hydraulic conductivity with depth, and compression of the wall of the soil when the cone was penetrated. Therefore, technique for penetrating cone is important, to avoid too much compressing the wall or making space for water penetration between the cone and soil.

---

\*東洋大学経営学部 〒112-8606 東京都文京区白山 5-28-20

Faculty of Business Administration, Toyo University 5-28-20, Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan

## 1. はじめに

土壌中の一次元不飽和浸透流の基礎方程式は、Richards 式によって解析される（宮崎ら、2005）。

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

ここで、 $\theta$  は体積含水率、 $t$  は時間、 $z$  は鉛直方向の距離、 $h$  はサクション、 $K(h)$  は不飽和透水係数、 $C(h)$  ( $=\partial\theta/\partial h$ ) は比水分量である。比水分容量は、水分特性関数  $\theta(h)$  を微分することで得られる。

このように、土壌における物質移動を考える際に重要な水分移動特性として、水分特性関数と不飽和透水係数がある。水分特性の測定には、吸引法、土柱法、加圧板法、サイクロメーター法といった方法があり、不飽和透水係数の測定には、圧力制御法、流速制御法、水分分布法といった方法がある（中野ら、1995）。これらの方法は大変な手間と時間がかかるため、簡便な測定法が求められている。

Gribb (1996) は、現場で簡易に不飽和透水係数と水分特性曲線を測定する方法として、Companella and Robertson (1998) の装置を元に、コーンペネトロメーターを改良した装置を設計した。コーンペネトロメーターは、先端が円錐形（コーン）となっている Fig.1 のような形をした装置で、土中に突き刺すことで土壌の貫入抵抗を測定するために用いられる装置である。このコーンの中から給水口を通して給水し、土中に水が浸潤するときの積算浸潤量と 2 箇所のテンシオメーターの読みを連続的に測定して、そこから円筒座標系の Richards 方程式によって逆解析法によって水分特性曲線と不飽和透水係数を推定する、という手法である。Gribb (1996) は、感度解析によって、この方法により均一な砂の飽和透水係数と水分特性曲線の van Genuchten パラメーター  $\alpha$  を精度良く決定可能であるとした。一方で、不飽和透水係数と水分特性曲線を精度良く求めることはできないであろうとした。

Gribb et al. (1998) は、この装置のプロトタイプを作成し、実験室内の 4.7 m 四方、深さ 2.6 m の砂質土槽において測定をした。Kodesova et al. (1998) は、この装置をコーンパーミアメーターと名付け、この実験結果をもとに逆解析をした。その際に、Gribb (1996) が十分な精度で不飽和透水係数を求められないとしたことを受けて、初期および最終の水分量の測定値を逆解析に用いた。飽和透水係数と  $\alpha$  の値は大変良好に、他のパラメーターもほぼ良好に得られ、結果として不飽和透水係数と水分特性曲線を十分な精度で求めることができたとした。

Simunek et al. (1999) は、実験室でコーンパーミアメーターを用いて、砂質土槽において浸潤過程と再分布過程の両方の測定をして、その逆解析をすることで、水分特性曲線の吸水過程と脱水過程、すなわちヒステリシスを求め、ほぼ良好に測定できることを示した。Kodesova et al. (1999) は、コーンパーミアメーターを用いて、異なる砂質土壌の現場にて測定を行った。その結果、ほぼ良好に水分特性曲線と不飽和透水係数のパラメーターを逆解析推定することができた。

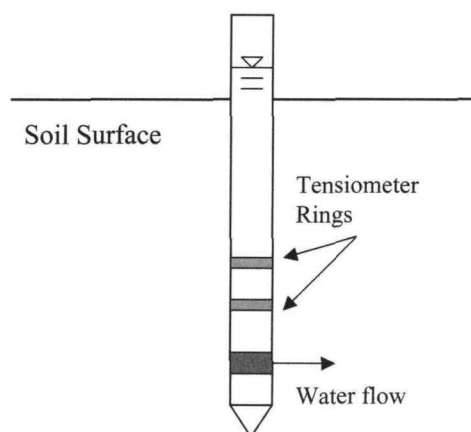


Fig.1 Schematic of the Cone Permeameter.

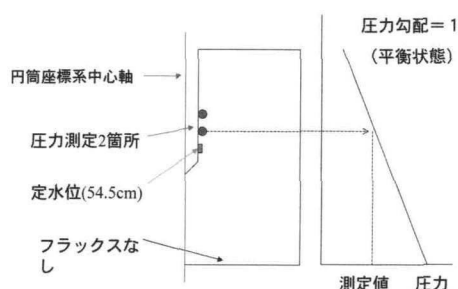


Fig.2 初期条件と境界条件

このように、コーンパーミアメータの研究は当初から一貫して砂質土壌を対象として行われているが、ローム土壌等の他の土壌においては適用可能であるかどうかは、十分に検討されていない。そこで、本研究ではコーンパーミアメータを作成して、現場測定を行い、不飽和透水係数、水分特性曲線を求めることで、コーンパーミアメータの日本の火山灰土壌への適用性を検討した。

## 2. 測定方法

### 2-1. 装置

コーンパーミアメータは、Fig.1 のようなコーンと給水タンク、流量センサ、圧力センサ、データロガー、制御盤、バッテリーボックスによって構成される。コーンパーミアメータの外径は 3 cm、内径は 2.4 cm である。10 リットル容積のポリタンクからコーン内部に給水し、その流量を流量計によって測定する。コーン内部から、給水口を通して土中に水が供給し、その際の給水圧は一定に制御できるようになっている。2 箇所のテンシオメーターリングをゲージ圧形式の圧力センサに脱気水により接続している。テンリオリングからの出力による圧力水頭と、流量計からの出力による積算給水量をデータロガーにより一定時間間隔で自動的に測定できるようになっている。この装置は大起理化(株)の協力によって製作された。

### 2-2. 現場

測定は群馬県嬬恋村のキャベツ畑にて行った。黒ボク土壌で、作土層厚は平均 20 cm である。深さ 30-40 cm に耕盤層が存在することがコーンペネトロメーター（貫入抵抗測定装置）によって確認され、100 cm<sup>3</sup> サンプラーによる飽和透水係数測定結果によれば、作土層においては  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  cm/s のオーダーであるが、耕盤層以下は  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  cm/s の

オーダーと明確に低下していた。

## 2-3. 測定

地表面から深さ 28.5 cm の位置に吸水口が位置する様に埋設し、自由水面は給水口から上部 54.5 cm に設定した。テンシオメーターの位置は、給水口から上部 8.5 cm と 11.5 cm である。埋設は、オーガーによってコーンパーミアメーターの直径とほぼ等しい穴を設定深さまであけてから、コーンパーミアメーターを地中に挿入した。その後、テンシオメーターリングの圧力水頭が平衡に達するまで待ってから、給水を開始し、給水開始時からの積算侵入量と上下テンシオメーターの圧力水頭を連続的に測定した。テンシオメーターが平衡に達したかどうかは、データロガーに表示される圧力の読みをみて判断した。測定は 1 日に 1 回、3 日間で合計 3 回行った。

## 3. 解析

積算給水量と圧力水頭のデータから、円筒座標系の Richards 式を用いて有限要素法の逆解析を行い、水分特性曲線と不飽和透水係数を求めた。解析には、土中の水分移動をシミュレートするためにアメリカの Salinity Laboratory が開発した Hydrus 2D というソフトウェアを用いた。

Fig.2 に初期条件と境界条件を示す。初期条件は、圧力勾配を 1 として無関係な水分移動がおきないようにした上で、下部テンシオメーターの測定値を一致させた。境界条件は、給水部は定水位、それ以外はフラックスなしとした。土壌物理モデルは、Mualem-Brooks-Corey 式を用いた。

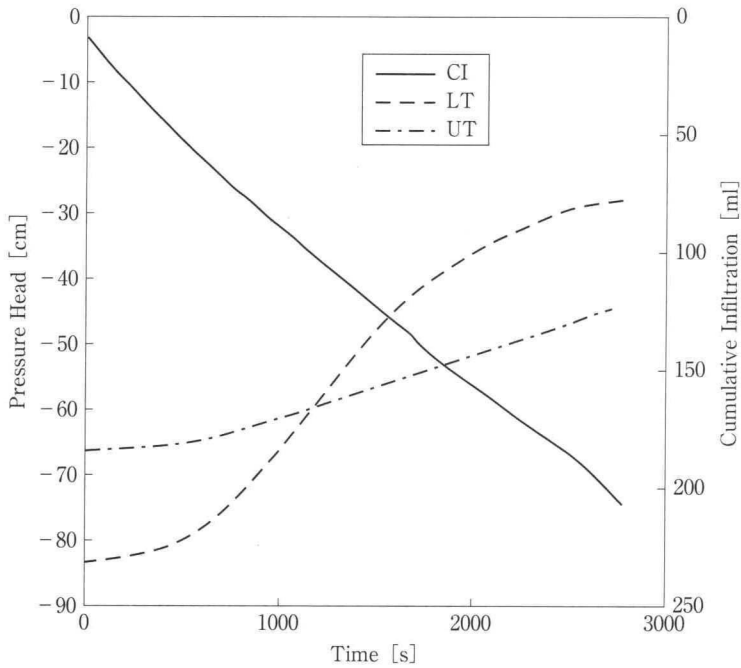
$$S_e = \begin{cases} |\alpha h|^{-n} & h < -\frac{1}{\alpha} \\ 1 & h \geq -\frac{1}{\alpha} \end{cases}$$

$$K(h) = K_s S_e^{2/n+1+2}$$

ここで、 $S_e$ ：有効水分量、 $K_s$ ：飽和透水係数、 $\alpha$ ,  $n$ ,  $l$ ：パラメータである。

## 4. 結果

積算侵入量および下部テンシオメーター、上部テンシオメーターの変化を Fig.3 に示す。積算侵入量は時間に対してほぼ直線的に増加する。すなわち、侵入速度がほぼ一定の定常浸潤がみられた。圧力水頭については、下部テンシオメーターは -83 cm から -28 cm まで、上部テンシオメーターは -66 cm から -45 cm まで上昇した。この際に、下部テンシオメーターの上昇速度が上部テンシオメーターよりも大きいため、1150 秒、-60 cm において上下テンシオメーターの値が一致しグラフが交差している。このようなデータはたとえば Simunek (1999) のデータでは見られないものであり、上下テンシオメーターの



**Fig.3** Measured pressure heads of lower tensiometer (LT) and upper tensiometer (UT) and cumulative infiltration (CI) .

位置において土の性質が均質ではないことを示唆している。

Hydrus 2D を用いて Fig.3 の積算浸潤量と圧力変化を与えるような土壌物理特性値を逆解析によって計算したところ、積算浸潤量はほぼこの測定値を満足にシミュレートできたが、圧力に関しては、上下テンシオメーターの値を同時にあわせることはできなかった。そこで、上部テンシオメーターの値は逆解析には用いずに、下部テンシオメーターをあわせるように計算した。これは、初期条件を Fig.2 のように下部テンシオメーターにあわせて平衡条件を仮定したためである。上下テンシオメーターの値が交差することから、前述の様に、上部テンシオメーターの土壌物理特性が下部のものとは異なるものと考えたことも、給水口の近くである下部テンシオメーターの測定値に結果をあわせた理由である。このような不均一性が測定結果におよぼす影響については、後に考察する。

いくつかの課題を残したものの、積算侵入量と下部テンシオメーターの値のみを用いることにより、良好に逆解析を行うことができた。その結果、Brooks-Corey 式のパラメーターが  $\theta_R=0.0885$ 、 $\theta_s=0.569$ 、 $\alpha=0.0503$ 、 $n=0.243$ 、 $l=0.200$ 、 $K_s=2.62 \times 10^{-5} \text{ (cm/s)}$  という結果が得られた。このときの水分特性曲線と不飽和透水係数を Fig.4, 5 に示す。水分特性曲線については、吸引法によって測定した値と比較している。Fig.2 において、サクシオンは 80 cm から 25 cm までの範囲で推移しているが、このサクシオン範囲における体積含水率は、コーンパーミアメーターの値と吸引法の値が良好に一致している。

一方、80 cm よりもサクシオンが大きいところでは実測値とコーンパーミアメーターに

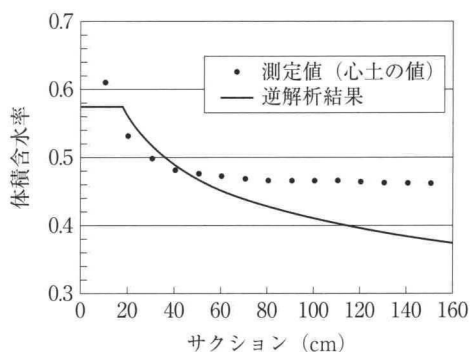


Fig.4 水分特性曲線

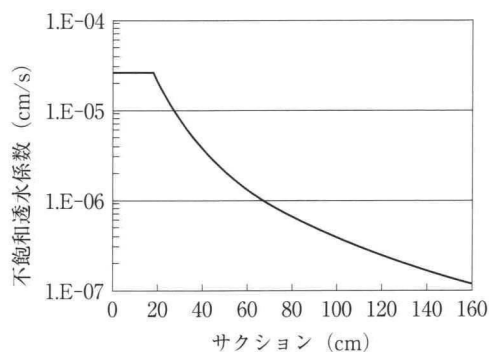


Fig.5 不飽和透水係数

よって求められた値の差が大きくなった。すなわち、逆解析に用いられた圧力範囲を超える部分に関しては、逆解析の結果は十分に信頼できるものとはなっていない。この点は、コーンパーミアメーター測定の際に留意すべきところである。すなわち、使用する土壤物理モデルを十分に特徴づけるだけの水分変化が起きない限り、精度の高い逆解析推定はできない。したがって、初期水分量が小さい土壌に対して測定をすることで、より確かな推定を行うことができる。

3回の反復のうち、1回はこのようにほぼ良好なデータが得られたが、残りの2回に関しては、逆解析により適正な土壤物理パラメータを推定することができなかった。そのうちの1回は、侵入を開始してから急激に下部テンシオメーターの値が上昇して、圧力が正圧になった。上部テンシオメーターも、それからやや遅れるものの上昇し、正圧になった。これは、コーンを挿入するために開けた穴が大きすぎたため、穴とコーンの間に空間ができて、その空間内が湛水したためである。Kodesova et al. (1999) は、直径 3.2 cm のサンプラーで水分測定用の土壌を採取し、その際にできた穴に直径 4.06 cm のコーンを挿入した。つまり、穴をあける際に使用したサンプラーよりも 0.86 cm 直径が大きいコーンを挿入した。砂と黒ボク土では違うとはいえ、この穴の大きさは参考になる値である。

一方、もう1回の測定では、圧力が -130 cm から -100 cm まで緩やかに上昇した。このように小さな圧力で値がほぼ安定する曲線は、逆解析によってはうまく計算することができなかった。この原因については、土壌の不均一性などが考えられるものの、まだ十分に解明されていない。

## 5. 考察

飽和透水係数の値を、同じ圃場の同じ深さから 100 cc サンプラーによって不攪乱採取した試料における変水頭試験の値と比較したところ、不攪乱試料では  $1.9 \times 10^{-3}$  cm/s (3回の測定の対数平均値) となり、コーンパーミアメーターにより見積もられた飽和透水係数は、不攪乱試料の飽和透水係数と比べて 100 倍ほど小さいことが分かった。ゲルファーマメーターによる飽和透水係数の値は  $2.9 \times 10^{-4}$  cm/s であり、100 cc サンプラーよ

りもゲルフパーミアメータの値が10倍小さく、ゲルフパーミアメータよりもコーンパーミアメータがさらに10倍小さいという結果となった。さらに、ディスクパーミアメータによって土壌表面の透水係数を測定したところ、 $2.9 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ という値が出たが、この値は土壌表面の値であり、深さが異なれば透水係数の値も異なるため、直接の比較はできない。

このように測定法によって測定値に大きなばらつきが出たことは、一つには土壌の不均一性の問題がある。すなわち、本実験圃場は断面調査により深さ30～40 cmに耕盤層が存在し、侵入口よりも下方への水の浸透が抑制されている。このように、特に透水係数が不均一な分布をしている場合には、均一な分布であると仮定して逆解析推定をしても、正確な値が得られない。耕盤の深さが既知であれば、その層を別の物理性であるとして2層のパラメーターを同時に推定することは可能であるが、その際にはそれぞれの層が均一な分布をしていることと、深さが正確に分かっていることが求められる。逆解析によって求められた結果が、不均一な分布をしたものの平均的な値が求められれば良いのであるが、そのような保証はない。

測定法そのものに関わる別の問題として、穴にコーンを挿入する際に、コーンと壁面の間の摩擦によって、穴の内壁が圧縮され、その箇所の透水係数が低下した、という要因を考えることができる。

今回の計算では、下部テンシオメーターの測定値をもとに平衡条件を仮定して、水分の初期条件を与えた。より精度の良い解析をするためには、初期水分を測定し、それを解析の初期条件として用いることが考えられる。ただし、そのためには、慎重に不攪乱試料を採取して重量法により測定する必要があるため、測定の手間は多くなる。なるべく簡便に、より正確な値を得る、という研究の主旨によれば、初期水分を正確に測定しなくともある程度正確な値が得られることが好ましい。その意味で、今回の初期条件の与え方は、1つの簡便な手法を示すことができた。

初期水分の測定には、不攪乱試料を採取するほかにも、市販の現場水分計（商品名PR-10など）を用いる方法もあり、さらに、コーンパーミアメータの装置をそのまま利用するのであれば、コーンを挿入しながらテンシオメーターによって測定される圧力の値をデータロガーの表示を見ながら記録する、という方法もある。この場合は、テンシオメーターが2箇所あって、一度に2箇所の圧力を測定することができるため、たとえばコーンの挿入深さを3種類設定して測定をすれば、6つの深さの圧力を測定できる。この場合は、テンシオメーターの読みが平衡に達するまでの時間が比較的長くなるため、作業時間が長くなるという欠点がある。水分を重量法で測定するにせよ、他の方法で測定するにせよ、コーンを挿入する穴によって測定する方法をとる場合には、コーンよりも深い場所における水分量を測定することはできないため、いずれにせよ初期条件の設定のためには、平衡条件を仮定して深部へ外挿する作業が必要になる。

なお、既往の研究で紹介したアメリカにおける一連の研究においては、Simunek et al. (1999)の研究をきっかけとして、ヒステリシスの測定に重きをおいている。測定している対象がヒステリシスが大きくあらわれる砂であることが原因としては大きい。本研究で対象とした黒ボク土のように、ヒステリシスを無視してもさしつかえないと考えられる

場合は、再分布過程まで測定して解析に含めるところまでは必要ないと考えられる。

## 6. 結論

コーンパーミアメータにより、黒ボク土壌における水分特性曲線と不飽和透水係数を測定した。データの再現性の問題等、いくつかの解決すべき課題が残されたが、いくつかの具体的な改良点を提案できた。特に、穴をあけるとときに、穴の内壁とコーンの間に水がたまるような空間を作らず、さらに内壁を過度に圧縮してもいけない、つまり穴が大きすぎても小さすぎてもいけない、といったところにこの測定法のポイントがあることを指摘できた。

## 参考文献

- Campanella, R. G., and P. K. Robertson. Current status of the piezo-cone test, in Penetration Testing 1988, ISOPT-1, edited by J. De Ruiter, 93-116. A. A. Balkema, Brookfield, Vt. USA, 1998.
- Gribb, M. Parameter estimation for determining hydraulic properties of a fine sand from transient flow measurements. Water Res. Res. 32, 1965-1974. 1996.
- Gribb, M. M., J. Simunek, and M. F. Leonard. Development of a cone penetrometer method to determine soil hydraulic properties. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 124, 820-829, 1998.
- Kodesova, R., M. M. Gribb and J. Simunek. Estimating soil hydraulic properties from transient cone permeameter data. Soil Sci. 163, 436-453. 1998.
- Kodesova, R., S. Ordway, M. M. Gribb and J. Simunek. Estimation of soil hydraulic properties with the cone permeameter : field studies. Soil Sci. 164, 527-541. 1999.
- 宮崎毅, 長谷川周一, 粕渕辰昭. 土壌物理学, 朝倉書店. 2005.
- 中野政詩, 宮崎毅, 塩沢昌, 西村拓. 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会. 1995.
- Simunek, J., R. Kodesova, M. Gribb and M. T. van Genuchten. Estimating hysteresis in the soil water retention function from cone permeameter experiments. Water Res. Res. 35, 1329-1345. 1999.